

文章编号:1004-7220(2013)04-0418-08

急性无氧功率自行车运动对颈总动脉弹性模量和局部血液动力学的影响

朱勇^a, 侯杰^{a*}, 刘波^a, 朱亚冰^b, 邱天爽^a, 覃开蓉^a

(大连理工大学 电子信息与电气工程学部 a. 生物医学工程系; b. 信息与通讯工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: **目的** 研究急性无氧功率自行车运动对不同性别人体颈总动脉弹性模量和局部血液动力学的影响。**方法** 以9名男性和8名女性20~30岁年龄段的健康志愿者作为研究对象,使用无氧功率自行车持续进行4组相同强度的急性运动训练。应用彩色超声多普勒分别检测静息状态及每组运动训练后的颈总动脉管径波形、轴心流速波形,用电子自动血压计同步检测心率和血压大小。运用经典血液动力学理论对检测数据进行分析,计算颈总动脉的弹性模量和局部血液动力学参数,包括压力-应变弹性模量、流量率、周向应变、壁面切应力和振荡剪切指数。**结果** 运动后心率增加;随着运动的积累,颈总动脉弹性模量呈增加趋势;一个心动周期内轴心血流速度和流量率最大值与平均值上升,流速和流量率最小值下降;收缩压和平均压增高,舒张压无明显改变;周向应变无明显改变;切应力最大値有明显增加的趋势,切应力最小値下降趋势明显;振荡剪切指数也有增大的趋势。**结论** 急性无氧功率自行车运动可增加20~30岁年龄段不同性别志愿者的颈总动脉弹性模量,并对颈总动脉局部血液运动学和动力学功能参数产生明显的影响。本文结果将为无氧运动调控脑血管功能提供有用的血液动力学信息。

关键词: 无氧运动; 功率自行车; 弹性模量; 血液动力学; 颈总动脉

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

Acute effects of anaerobic exercises by a bicycle ergometer on elastic modulus and local hemodynamics in common carotid arteries

ZHU Yong^a, HOU Jie^{a*}, LIU Bo^a, ZHU Ya-bing^b, QIU Tian-shuang^a, QIN Kai-rong^a

(a. Department of Biomedical Engineering, b. School of Information and Communication Engineering, Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: **Objective** To investigate acute effects of anaerobic exercises by a bicycle ergometer on arterial elastic modulus and local hemodynamics in human common carotid arteries with different genders. **Methods** Nine male and eight female healthy young volunteers at the age of 20-30 year-old successively underwent four groups of exercise trainings with the same workload by an anaerobic bicycle ergometer. The waveforms of arterial diameter and center-line blood velocity were measured in the right common carotid artery using a color Ultrasonic Doppler for each group when at rest and right after exercise training. The heart rate, systolic and diastolic blood pressures were simultaneously measured in brachial artery using an automatic electronic sphygmomanometer. All the measured data were analyzed based upon the principle of classic hemodynamics. The arterial elastic modulus and local hemodynamic parameters, including pressure-strain elastic modulus, flow rate, circumferential strain, wall shear stress and oscillatory shear index (OSI), were then calculated. **Results** The heart rate and arterial elastic

收稿日期:2013-02-01; 修回日期:2013-03-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31370948, 10972139), 国家科技支撑计划项目(2012BAJ18B06), 中央高校基本科研业务费项目(DUT12JB11, DUT12RC(3)40)。

通信作者:覃开蓉, 教授, Tel: (0411)84709690; E-mail: krqin@dlut.edu.cn。

* 共同第一作者

modulus increased after exercises; with the accumulative exercises, in one cardiac cycle, the maximum and mean center-line velocity and flow rate increased while the minimum velocity and flow rate decreased; the systolic and mean blood pressure increased while diastolic blood pressure exhibited no significant change; no significant change could be found in the circumferential strain; the maximum and mean shear stress increased significantly while the minimum shear stress reduced; the oscillatory shear index also increased. **Conclusions** The anaerobic exercises by a bicycle ergometer may increase the arterial elastic modulus and induce significant effects on local hemodynamic parameters in common carotid arteries for young volunteers with different genders at the age of 20-30 year-old. The results in this study could provide useful hemodynamic information for regulation of cerebrovascular function by anaerobic exercises.

Key words: Anaerobic exercise; Bicycle ergometer; Elastic modulus; Hemodynamics; Common carotid artery

颈总动脉的弹性模量和局部血液动力学与心脑血管疾病的发生和发展密切相关^[1-2]。合理的运动训练能改善动脉弹性,从而降低血管疾病风险^[3-4]。人体在氧气充分供应情况下进行的具有中等(或中上)强度负荷的长时间有氧运动训练能有效降低动脉弹性模量^[5]。而以增强肌肉和体能为目的,肌肉在“缺氧”状态下进行的具有高强度负荷的瞬间性无氧运动训练对动脉弹性模量的影响则存在很多相互矛盾的结果报道^[6-7]。不同的无氧运动方式和强度以及不同性别均可对不同部位的动脉弹性模量产生不同的影响^[8-11]。

运动调控动脉弹性模量的血液动力学机制得到了很多研究的支持^[4,12-15],这是因为运动训练可直接诱发血液循环系统的全部和局部血液动力学响应,进一步调节血管的结构和功能改变。在体动脉受到血压、血压引起的周向应力和血流引起的切应力等多种机械应力作用^[16-18]。运动训练可改变这些血液动力学刺激,调节血管内皮细胞和平滑肌细胞分泌血管活性物质如一氧化氮(NO)及内皮素1(ET-1),进而对动脉功能产生影响,长期的累积效应将导致动脉的结构重建^[4,12]。迄今为止,虽然已有大量关于运动训练影响动脉弹性(或顺应性/弹性模量)和血液流动特征的研究结果报道^[3-15],但大部分研究主要针对运动对上、下肢外周动脉的血液流动特征和血管功能的影响展开,而且这些研究一般缺乏较深入的血液动力学分析。针对下肢无氧运动训练如何调节不同性别个体的颈总动脉弹性模量、局部血液流动和动力学特征,更未见全面、详细的研究结果报道。

本文旨在研究下肢无氧运动训练对不同性别个体的颈总动脉弹性模量和血液动力学特征的影响,

为寻找合理运动方式改善动脉弹性提供有效的血液动力学信息,也为进一步深入研究不同运动训练方式调控动脉功能及其血液动力学机制提供一定基础。

1 方法

1.1 受试者

9名男性(年龄21~28岁;体重55~79kg;身高170~180cm)和8名女性(年龄21~25岁;体重48~54kg;身高160~164cm)年轻健康志愿者参加本次研究。所有的受试者血压正常,没有心脑血管疾病和代谢疾病,而且在受试期间没有服用任何能够影响心率和血压的药物。同时向受试者解释本实验的流程以及可能存在的潜在危险,并且在实验前填写书面同意书。

1.2 实验方案

无氧运动训练按图1所示的实验流程进行。首先,测量运动前静息状态时的血液动力学参量。然后,踩踏无氧功率自行车(Powermax-VIII, Combi Wellness)进行腿部无氧运动训练。每个受试者相继进行强度相同的4组(定义为Group 1、2、3、4)30s踩踏无氧功率自行车训练,训练时保持自行车的转动速率为60 r/min,男性受试者的负荷为250W,女性受试者的负荷为200W。每一组运动训练结束后受试者有8min的休息时间,在休息期间尽快测量血液动力学参量。

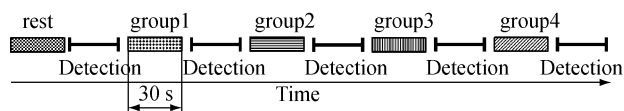


图1 无氧功率自行车运动流程图

Fig.1 Flow chart of anaerobic exercises by a bicycle ergometer

1.3 颈总动脉轴心血流速度和直径波形,以及肱动脉血压的测量

在静息状态下和各组运动训练之后,利用彩色超声多普勒 (ProSound Alpha 7, Aloka) 分别测量颈总动脉直径波形和轴心血流速度波形。用电子血压计 (Patient Monitor PM8000, Mindray) 同时测量肱动脉的收缩压 p_{s_mea} 、舒张压 p_{d_mea} 以及心率 (HR)。保存所有检测数据以便进行血液动力学分析。

1.4 颈总动脉局部血液动力学参数和弹性模量的计算

1.4.1 血压 生理血压范围内动脉血压和直径呈线性关系^[19],故颈总动脉的血压波形和直径波形相似。与文献[20]一致,假定颈总动脉的平均血压 p_m 和舒张压 p_d 与肱动脉处的平均压 p_{m_mea} 和舒张压 p_{d_mea} 近似相等。平均血压 p_m 用如下近似公式计算:

$$p_m = p_{m_mea} = p_{d_mea} + (p_{s_mea} - p_{d_mea})/3 \quad (1)$$

因此,用平均压 p_m 和舒张压 $p_d (= p_{d_mea})$ 对颈总动脉处直径波形的平均值和最小值进行标定,即得颈总动脉的血压波形。将颈总动脉处血压波形的最大值近似为颈总动脉收缩压 p_s 。

1.4.2 血流量率(Q) Q 通过下式计算:

$$Q = 2\pi R^2 \int_0^1 y \cdot u(y) dy \quad (2)$$

式中: R 为一个心动周期内颈总动脉半径的时间平均值, $y = r/R$, r 为径向坐标,且 $u(y)$ 满足^[18]:

$u(y, t) =$

$$\sum_{n=-N}^{+N} \frac{J_0(\alpha_n j^{\frac{3}{2}}) - J_0(\alpha_n j^{\frac{3}{2}} y)}{J_0(\alpha_n j^{\frac{3}{2}}) - 1} u(0, \omega_n) e^{j\omega_n t} \quad (3)$$

式中: n 为谐波数, N 为谐波数的最大值, $j = \sqrt{-1}$, J_0 是零阶第 I 类贝塞尔函数, $\alpha_n = R \sqrt{\rho\omega_n/\eta}$ 为 Womersley 数, ρ 为血液密度, η 为血液黏度, $\omega_n = 2n\pi f$ 为角频率, f 为基频, $u(0, \omega_n)$ 为实测轴心流速 $u(0, t)$ 的第 n 阶谐波分量,并且满足

$$u(0, t) = \sum_{n=-N}^{+N} u(0, \omega_n) e^{j\omega_n t} \quad (4)$$

v_{\max} 、 v_{\min} 、 v_{mean} 为一个心动周期内轴心血流速度波形的最大、最小和平均值; Q_{\max} 、 Q_{\min} 、 Q_{mean} 为一个心动周期血流量波形的最大、最小和平均值。它们分别代表收缩期、舒张期以及一个心动周期内颈总

动脉给脑血管的最大、最小和平均供血情况。

1.4.3 周向应变 (CS) CS 通过下式计算^[16-17]:

$$CS = \frac{R_s - R_d}{R_d} \quad (5)$$

式中: R_s 和 R_d 分别为一个心动周期内半径波形的最大和最小值。

1.4.4 壁面切应力(τ_w) τ_w 通过下式计算^[18]:

$$\tau_w = \frac{\eta}{R} \sum_{n=-N}^{+N} \frac{\alpha_n j^{\frac{3}{2}} J_1(\alpha_n j^{\frac{3}{2}})}{J_0(\alpha_n j^{\frac{3}{2}}) - 1} u(0, \omega_n) e^{j\omega_n t} \quad (6)$$

式中: J_1 为一阶第 I 类贝塞尔函数。 τ_{w_max} 、 τ_{w_min} 和 τ_{w_mean} 分别为一个心动周期内切应力波形的最大、最小和平均值,代表作用在血管内皮层的血流摩擦力最大、最小和平均值。

1.4.5 振荡剪切指数 (OSI) OSI 定义为^[21]:

$$OSI = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\left| \int_0^T \tau_w dt \right|}{\int_0^T |\tau_w| dt} \right) \quad (7)$$

式中: T 为心动周期,且满足 $T = 1/f$ 。OSI 代表切应力的前后双向振荡程度。

1.4.6 压力-应变弹性模量(E_p) E_p 可以表示为^[22]:

$$E_p = \frac{p_s - p_d}{R_s - R_d} R_d \quad (8)$$

式中: p_s 和 p_d 分别为收缩压和舒张压; R_s 和 R_d 分别为一个心动周期半径波形的最大和最小值。

1.5 数据处理与统计分析

利用检测的管径 (见图 2(a)) 和轴心流速 (见图 2(b)) 波形及血压数据,用商业软件包 Matlab R2009b (The MathWorks, Inc) 根据前面提到的公式编程,计算运动前后各状态男、女志愿者的颈总动脉血流量率波形 (见图 2(c))、切应力波形 (见图 2(d)) 以及相关的血液运动学和动力学参数。计算时取血液黏度 $\eta = 4 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 血液密度 $\rho = 1050 \text{ kg/m}^3$, 方程(3)、(4)和(6)中谐波数 $N = 20$ 。

利用商业软件 GraphPad Prism (GraphPad Software, Inc) 对所有数据进行统计分析,数据的均值和标准差如图 3~6、表 1 所示。利用 t 检验方法分析运动后各状态 (Group 1~4) 与静息状态各数据参量的差异, $P < 0.05$ 表示存在显著性差异。

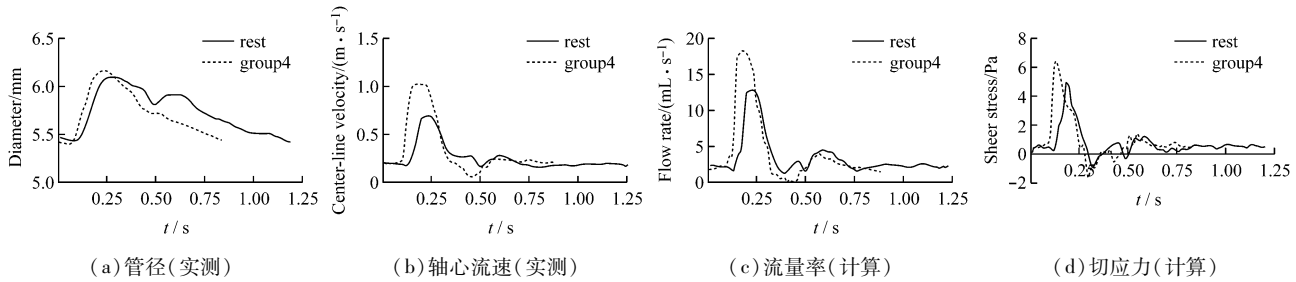


图2 某男性志愿者运动前后的颈总动脉管径、轴心流速、流量率和切应力波形

Fig.2 Diameters, center-line velocities, flow rates and shear stresses of a male volunteer at rest and right after exercise of Group 4 (a) Diameters (measured), (b) Center-line velocities (measured), (c) Flow rates (calculated), (d) Shear stresses (calculated)

2 结果

2.1 管径、轴心流速、流量率和切应力波形

图2(a)~(d)分别显示某男性志愿者运动前后管径、轴心流速、流量率和切应力波形。与运动前的静息状态相比,运动后的波形周期减小,最大值增大、最小值减小。

2.2 心率、轴心流速和流量率的最大、平均和最小值

与运动前的静息状态比较,运动后志愿者心率明显加快(见图3(a))。图3(b)显示运动前后志愿者颈总动脉轴心流速最大、平均和最小值的变化情

况。与运动前相比,志愿者运动后的最大和平均轴心流速增大,而最小流速减小。男性志愿者在经过Group 4的训练后,轴心流速的平均和最小值与运动前无显著性差异。图3(c)显示运动前后流量率最大、平均和最小值的变化情况。运动后志愿者的流量率最大值均有显著性升高,男性志愿者平均流量率略有升高(Group 1状态有显著性升高),女性志愿者的平均流量率则显著性升高;志愿者的最小流量率则有减小(部分显著性减小),男性志愿者的最小流量率出现负值,说明男性志愿者的流量率在舒张期有反向流动存在。

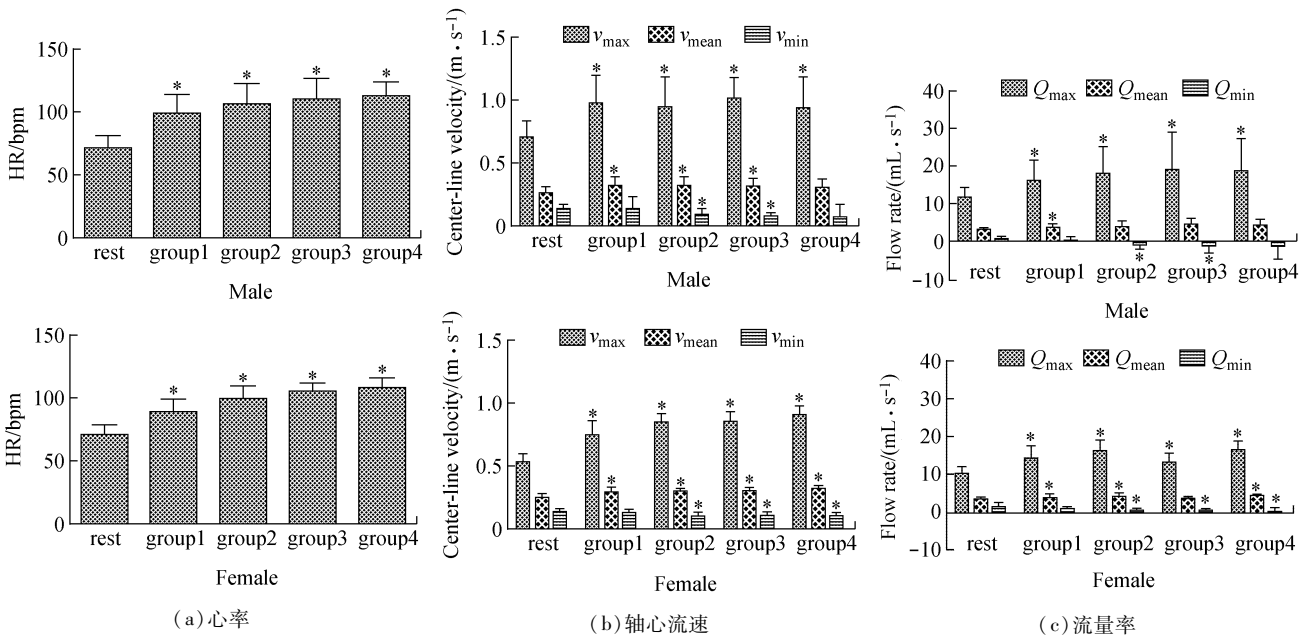


图3 运动前后的心率、颈总动脉轴心流速和流量率(* $P < 0.05$)

Fig.3 Heart rates, carotid arterial center-line velocities and flow rates at rest and right after exercises (a) Heart rates, (b) Maximum, mean and minimum center-line velocities, (c) Maximum, mean and minimum flow rates

2.3 收缩压、平均压、舒张压和周向应变

与运动前相比,运动后志愿者的收缩压普遍显著性升高;随着运动量的累积,从 Group 2 开始男性志愿者的平均血压明显升高,而女性志愿者的平均血压除了 Group 1 状态有显著性差异外,其他状态均无明显改变;运动前后志愿者的舒张压无明显改变(见图 4(a))。除女性志愿者在 Group 3 状态外,运动前后的周向应变无显著性改变(见图 4(b))。

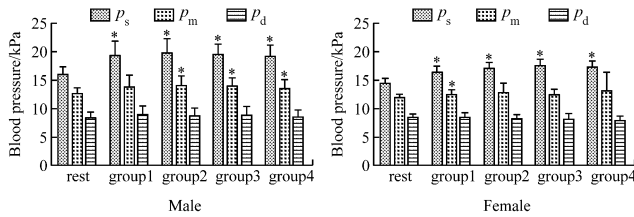
2.4 壁面切应力和振荡剪切指数

图 5(a) 显示运动前后志愿者颈总动脉壁面切应力的变化情况。除男性志愿者在 Group 4 状态最大切应力无显著性改变外,运动后志愿者的最大切应力都有显著性增大趋势;女性志愿者的平均切应力显著增大,而男性志愿者除 Group 3 外,平均切应

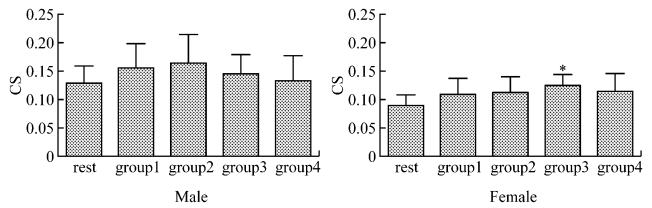
力无显著性改变;运动后女志愿者的最小切应力值呈显著性减小趋势,男性志愿者 Group 2 和 Group 3 状态最小切应力显著性减小。图 5(b) 显示运动前后志愿者颈总动脉的 OSI 情况。男性志愿者从 Group 2 状态开始,OSI 有显著性升高;而女性志愿者除 Group 2 状态外,OSI 无显著性改变。

2.5 运动前后颈总动脉压力—应变弹性模量

图 6 显示志愿者运动前后颈总动脉压力—应变弹性模量的情况。运动后志愿者颈总动脉压力—应变弹性模量显著增大,并且随着运动量的累积,从 Group 3 开始,男性志愿者的颈总动脉压力—应变弹性模量呈极显著性增大;而女性志愿者运动后的颈总动脉压力—应变弹性模量略有增加,Group 2 和 Group 4 状态时显著增大。



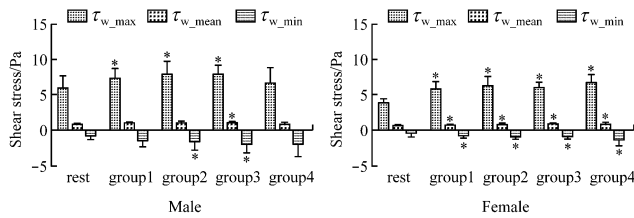
(a) 收缩压、平均压和舒张压



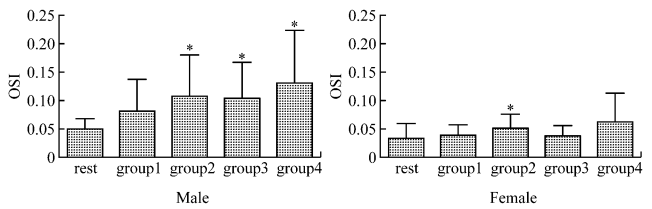
(b) 周向应变

图 4 运动前后的颈总动脉血压和周向应变 (* P < 0.05)

Fig. 4 Carotid arterial blood pressures and circumferential strains at rest and right after exercises (a) Systolic, mean and diastolic blood pressures, (b) Circumferential strains



(a) 壁面切应力



(b) 振荡剪切指数

图 5 运动前后的颈总动脉壁面切应力和振荡剪切指数 (* P < 0.05)

Fig. 5 Carotid arterial wall shear stresses and oscillatory shear indexes at rest and right after exercises (a) Maximum, mean and minimum wall shear stresses, (b) Oscillatory shear indexes

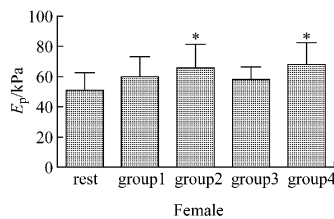
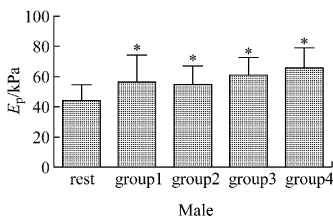


图 6 运动前后的颈总动脉压力—应变弹性模量 (* P < 0.05)

Fig. 6 Carotid arterial pressure-strain elastic modulus at rest and right after exercises

2.6 运动前后血液动力学参数的性别差异

表 1 列出了不同性别组之间运动前后各状态血液动力学存在明显差异的参数 v_{max} 、 Q_{min} 、 p_s 、CS、

$\tau_{w_{max}}$ 、 $\tau_{w_{min}}$ 、OSI 数值的比较(无统计学差异的参数则没有列入)。部分所列参数在运动训练前后的各状态男女性别组之间存在显著性差异。

表 1 运动前后血液动力学参数的性别差异 (* $P < 0.05$)

Tab. 1 Gender differences in the hemodynamic parameters at rest and right after exercises

		Rest	Group1	Group2	Group3	Group4
$v_{max}/(m \cdot s^{-1})$	Male	0.71 ± 0.12	0.98 ± 0.22	0.95 ± 0.24	1.02 ± 0.16	0.94 ± 0.25
	Female	0.53 ± 0.06 *	0.75 ± 0.11 *	0.85 ± 0.07 *	0.85 ± 0.08 *	0.91 ± 0.07
$Q_{min}/(mL \cdot s^{-1})$	Male	0.94 ± 0.37	0.15 ± 1.15	-0.77 ± 1.18	-1.11 ± 1.86	-1.26 ± 3.21
	Female	1.58 ± 0.96	0.96 ± 0.39	0.57 ± 0.52 *	0.64 ± 0.27 *	0.14 ± 0.99
p_s/kPa	Male	15.95 ± 1.41	19.24 ± 2.58	19.71 ± 2.52	19.36 ± 1.93	18.83 ± 8.49
	Female	14.40 ± 0.89	16.41 ± 1.07 *	17.09 ± 1.06 *	17.44 ± 1.23 *	17.26 ± 1.19 *
CS	Male	0.13 ± 0.03	0.15 ± 0.04	0.16 ± 0.05	0.15 ± 0.03	0.13 ± 0.04
	Female	0.09 ± 0.02 *	0.11 ± 0.03 *	0.11 ± 0.03 *	0.13 ± 0.02	0.11 ± 0.03
$\tau_{w_{max}}$	Male	5.83 ± 1.85	7.28 ± 1.36	7.79 ± 1.84	7.77 ± 1.40	6.55 ± 2.25
	Female	3.85 ± 0.67 *	5.80 ± 1.08 *	6.32 ± 1.27	6.06 ± 0.74 *	6.78 ± 1.12
$\tau_{w_{min}}$	Male	-1.00 ± 0.34	-1.52 ± 0.89	-1.78 ± 0.99	-2.05 ± 1.16	-1.94 ± 1.79
	Female	-0.38 ± 0.47 *	-0.72 ± 0.32 *	-0.96 ± 0.30 *	-0.86 ± 0.35 *	-1.30 ± 0.84
OSI	Male	0.05 ± 0.02	0.08 ± 0.06	0.11 ± 0.07	0.10 ± 0.06	0.13 ± 0.09
	Female	0.03 ± 0.03	0.04 ± 0.02	0.05 ± 0.02	0.04 ± 0.02 *	0.06 ± 0.05

3 讨论

无氧功率自行车运动可明显改变颈总动脉部位的血流特征。具体表现在运动后心率明显加快,管径、轴心流速和流量率最大值和平均值增大、最小值减小(见图 2、3)。说明运动后心收缩期颈总动脉单位时间的供血量明显增加,舒张期颈总动脉单位时间的供血量减小。随运动量的累积,这种特征逐步放大。男性志愿者在舒张期还出现负流量(即反向流)现象,这与文献[4]中报道的下肢运动对肱动脉处血流特征的影响规律一致。

无氧功率自行车运动可调节颈总动脉部位的血液动力学环境。运动后,男、女志愿者颈总动脉收缩压、平均压呈明显升高趋势,舒张压未见明显变化(见图 4(a)),男性志愿者的周向应变无明显改变(见图 4(b))。运动后颈总动脉血流切应力最大和平均值增大、最小值减小且为负值(见图 2(d)、图 5(a)),OSI 增大(见图 5(b))。以往的研究表明^[16-17,23-24],周向应力和切应力可直接作用于动脉内皮细胞,调节内皮细胞的血管活性物质(如 NO 和 ET-1)的分泌,影响血管中膜平滑肌的舒缩,进而影

响血管壁的功能。Ku 等^[25]的研究表明,切应力、OSI 与颈动脉粥样硬化斑块厚度密切相关。Green^[4]报道的结果也证实不同的运动方式和运动强度可引起肱动脉处产生不同程度的反向流现象,OSI 将产生不同的改变,进一步对肱动脉的内皮功能产生不同的影响。

无氧功率自行车运动急性地增加颈总动脉壁的弹性模量(见图 6),推断产生这种负面影响的原因之一是下肢运动引起颈总动脉血液动力学环境明显改变而导致,特别是血压、切应力、OSI 的升高可能是主要因素之一^[13]。然而,究竟是哪些血液动力学特征量起关键作用、是否能通过增加无氧功率自行车运动的强度改变这些血液动力学特征改善颈总动脉的弹性,还需要深入开展运动调控颈总动脉功能及其血液动力学机制的相关研究,才能阐明这些问题。

随着运动组数的增加和运动时间的累积,大部分参数呈增加趋势(见图 3~6)。男、女志愿者组之间的结果受运动影响的规律基本类似。不同性别志愿者组之间在运动前后某些状态部分的血液运动学参数数值存在显著差异,而弹性模量在运动前后各

状态均无显著的性别差异(数据未公布)。对于运动前的静息状态,男、女志愿者之间部分参数的显著性差异应该是性别本身造成的。但运动之后,男、女志愿者之间结果的差异除性别本身的因素外,还可能受运动强度不同(男性每次 250 W,女性每次 200 W)的影响。由于男、女志愿者之间存在体力上的差异,在实验中很难保证两组志愿者的运动强度完全一致。

4 结论

本文较详细地报告了无氧功率自行车运动对颈动脉弹性模量和局部血液动力学参数的影响。结果表明,运动后的血液运动学参数包括心率、轴心血流速度和血流量率最大、平均值均呈上升趋势,流速和血流量率最小值呈下降趋势;血液动力学参数包括收缩压、平均压、切应力最大值、OSI 有明显增加的趋势,切应力最小值有明显下降的趋势。运动组数、运动时间以及性别差异都可能参与无氧功率自行车运动对颈总动脉血液动力学特征的调控。

参考文献:

- [1] 柳兆荣,李惜惜. 血液动力学原理和方法[M]. 上海:复旦大学出版社,2007.
- [2] Nagai Y, Fleg JL, Kemper MK, *et al.* Carotid arterial stiffness as a surrogate for aortic stiffness: Relationship between carotid artery pressure-strain elastic modulus and aortic pulse wave velocity [J]. *Ultrasound Med Biol*, 1999, 25(2): 181-188.
- [3] Green DJ, O'Driscoll G, Joyner MJ, *et al.* Exercise and cardiovascular risk reduction: Time to update the rationale for exercise [J]. *J Appl Physiol*, 2008, 105(2): 766-768.
- [4] Green DJ. Exercise training as vascular medicine: Direct impacts on the vasculature in humans [J]. *Exerc Sport Sci Rev*, 2009, 37(4): 196-202.
- [5] Tabara Y, Yuasa T, Oshiumi A, *et al.* Effect of acute and long-term aerobic exercise on arterial stiffness in the elderly [J]. *Hypertens Res*, 2007, 30(10): 895-902.
- [6] Braith RW, Stewart KJ. Resistance exercise training: Its role in the prevention of cardiovascular disease [J]. *Circulation*, 2006, 113(22): 2642-2650.
- [7] Miyachi M, Kawano H, Sugawara J, *et al.* Unfavorable effects of resistance training on central arterial compliance: A randomized intervention study [J]. *Circulation*, 2004, 110(18): 2858-2863.
- [8] Okamoto T, Masuhara M, Ikuta K. Upper but not lower limb resistance training increases arterial stiffness in humans [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2009, 107(2): 127-134.
- [9] Ranadive SM, Fahs CA, Yan H, *et al.* Comparison of the acute impact of maximal arm and leg aerobic exercise on arterial stiffness [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2012, 112(7): 2631-2635.
- [10] Maeda S, Otsuki T, Iemitsu M, *et al.* Effects of leg resistance training on arterial function in older men [J]. *Br J Sports Med*, 2006, 40(10): 867-869.
- [11] Collier SR. Sex differences in the effects of aerobic and anaerobic exercise on blood pressure and arterial stiffness [J]. *Genet Med*, 2008, 5(2): 115-123.
- [12] Gonzales JU, Thompson BC, Thistlethwaite JR, *et al.* Association between exercise hemodynamics and changes in local vascular function following acute exercise [J]. *Appl Physiol Nutr Metab*, 2011, 36(1): 137-144.
- [13] Gonzales JU, Thompson BC, Thistlethwaite JR, *et al.* Role of retrograde flow in the shear stimulus associated with exercise blood flow [J]. *Clin Physiol Funct Imaging*, 2008, 28(5): 318-325.
- [14] Laughlin MH, Newcomer SC, Bender SB. Importance of hemodynamic forces as signals for exercise-induced changes in endothelial cell phenotype [J]. *J Appl Physiol*, 2008, 104(3): 588-600.
- [15] Newcomer SC, Thijssen DHJ, Green DJ. Effects of exercise on endothelium and endothelium/smooth muscle cross talk: Role of exercise-induced hemodynamics [J]. *J Appl Physiol*, 2011, 111(1): 311-320.
- [16] Dancu MB, Berardi DE, Heuvel JP, *et al.* Asynchronous shear stress and circumferential strain reduces endothelial NO synthase and cyclooxygenase-2 but induces endothelin-1 gene expression in endothelial cells [J]. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*, 2004, 24(11): 2088-2094.
- [17] Dancu MB, Berardi DE, Heuvel JP, *et al.* Atherogenic endothelial cell eNOS and ET-1 responses to asynchronous hemodynamics are mitigated by conjugated linoleic acid [J]. *Ann Biomed Eng*, 2007, 35(7): 1111-1119.
- [18] Qin KR, Xu Z, Wu H, *et al.* Synergy of wall shear stress and circumferential stress in straight arteries [J]. *J Hydrodyna Ser B*, 2005, 17(6): 752-757.
- [19] Sugawara M, Niki K, Furuhashi H, *et al.* Relationship between the pressure and diameter of the carotid artery in humans [J]. *Heart Vessels*, 2000, 15(1): 49-51.
- [20] Heffernan KS, Jae SY, Wilund KR, *et al.* Racial differences in central blood pressure and vascular function in young men [J]. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 2008, 295(6): H2380-2387.